

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**Szilikonolaj nemlineáris viszkoelasztikus  
tulajdonságainak mérése és modellezése**

Szerző:  
**Kőkuti Zoltán**

Témavezető:  
**Dr. Czirják Attila**

Fizika Doktori Iskola  
Műszaki és Anyagtudományi Intézet  
Szegedi Tudományegyetem  
Természettudományi és Informatikai Kar

2015  
Szeged

## Bevezetés

A reológia a fluidumok, vagyis gázok, folyadékok és folyadékszerű lágy anyagok mechanikai deformációjával, illetve folyásával foglalkozik, azok anyagi törvényszerűségeit írja le. A legismertebb reológiai fogalmak a viszkozitás és annak függése a hőmérséklettől vagy a nyírási sebességtől, továbbá a viszkoelasztikus illetve a plasztikus viselkedés. A reológia tárgykörébe elsősorban olyan anyagok tartoznak, amelyek összetett deformációs tulajdonságokat mutatnak. Utóbbiaknak az anyagszerkezettel való alapvető kapcsolata miatt a reometria, azaz a reológiai jellemzők mérése fontos anyagvizsgálati módszer is. Napjainkban főként a műszaki, az anyag- illetve az élettudományokban megjelenő komplex folyadékok vizsgálatának elengedhetetlen eleme a reológia és a reometria, továbbá az élelmiszeripar, építőipar, gyógyszeripar, vegyipar, járműipar fejlődése is mindinkább szükségessé teszi a termékekben és rendszerekben jelen levő fluidumok pontos kontinuummechanikai leírását.

A viszkoelasztikus folyadékok a reológiában tanulmányozott legfontosabb anyagok közé tartoznak. Az ilyen folyadékok rugalmas tulajdonságait általában hosszú láncmolekulák biztosítják, nem meglepő tehát, hogy a tipikus viszkoelasztikus folyadék valamely polimer olvadáka vagy oldata. Ha elegendően nagy nyírásnak teszünk ki egy viszkoelasztikus folyadékot, akkor általában nemlineáris anyagi választ kapunk. A nemlineáris viszkoelasztikus anyagi jellemzők mérése és modellezése a modern reológia legbonyolultabb problémái közé tartozik.

A szilikonolajokat (poli-dimetil-sziloxán, PDMS) igen széles körben alkalmazzák az alap és alkalmazott kutatástól kezdve egészen a szerteágazó ipari felhasználásokig. Különleges reológiai viselkedésük miatt gyakran használják a polimerkémiai és az anyagtudományokban. Tesztfolyadékként előszeretettel

alkalmazzák új reológiai elméletek, újszerű mérési eljárások és mérőműszerek hitelesítésére. Egyes reométer gyártó vállaltok a készülékek mindenkor kalibráláshoz is bizonyos szilikonolajokat használnak. A járműipar elsősorban a rezgések és lengések kontrollált csillapítására használja a szilikonolajokat. Speciális alkalmazási területe a dugattyús motorok főtengelyének szabad végén elhelyezkedő torziós viszkózus lengéscsillapító, ahol a szükséges nagy viszkozitást a szilikonolaj biztosítja. Ahhoz, hogy a nagy viszkozitású szilikonolajokat megfelelően tudjuk felhasználni az alap kutatásokban és az ipari alkalmazásokban, nélkülözhetetlen, hogy megismerjük az anyag részletes reológiai tulajdonságait, mind a lineáris mind a nemlineáris viszkoelasztikus tartományban.

Kutatómunkámban egy nagy viszkozitású szilikonolaj reológiai tulajdonságainak részletes kísérleti vizsgálatát, és a mérési eredményekre alapozott modellezését végeztem el. Az erre a célra mintaként kiválasztott konkrét anyag jól reprezentál egy fontos anyagsaládot. Kutatómunkám motivációját és ipari háttérét az előző bekezdésben említett járműipari alkalmazás adta. A szakirodalomban rendkívül kevés megbízható információ állt rendelkezésre az általam vizsgált nagy viszkozitási tartományba eső szilikonolajok reológiai tulajdonságairól, aminek egyik fontos oka az, hogy ezek az anyagok több szempontból is nehezen mérhetőek a tipikus műszerek mérési képességeivel. A saját méréseim során ezért igyekeztem a legmodernebb mérőműszerekhez is hozzáférni, aminek során sikerült értékes új szakmai kapcsolatokat kialakítanom hazai és külföldi kutatóhelyekkel, ipari partnerekkel. A matematikai modellezés során törekedtem arra, hogy a modell egyenletei a kellően pontos leírás mellett lehetőség szerint szemléletes fizikai tartalommal is bírjanak. Az egyenletek numerikus megoldásához széles körben használatos, a maguk területén standardnak tekinthető szoftvereket alkalmaztam.

## Célkitűzések

Első lépésként a célom a reprezentánsnak választott szilikonolaj alapvető reológiai jellemzőinek minél pontosabb megmérése volt a Szegedi Tudományegyetemen hozzáférhető rotációs reométer segítségével, a lehető legszélesebb hőmérsékleti és nyírási sebesség illetve frekvencia tartományban. Már ekkor kiderült, hogy ez a szilikonolaj egy nemlineáris viszkoelasztikus folyadék, ami feltehetőleg néhány olyan fontos reológiai szabálynak is eleget tesz, amelyek lehetővé tesznek egy viszonylag egyszerű, fizikailag is interpretálható koncentrált paraméteres reológiai modell megalkotását.

A fentiek alapján célul tűztem ki a reometriai mérések kiterjesztését több irányban is. Egyrészt az alkalmazások szempontjából fontos célom volt, hogy a veszteségi és tárolási moduluszokat, illetve a belőlük kiszámítható lineáris viszkoelasztikus paramétereket minél szélesebb frekvencia tartományban meghatározzam. Ehhez, végülis a Diffusing Wave Spectroscopy módszer bizonyult járható útnak.

Mivel az úgynevezett Cox-Merz szabály teljesülése fontos szerepet játszott az általam tervezett nemlineáris viszkoelasztikus modellben, ezért fontos célom volt ezt nagy pontossággal ellenőrizni minél szélesebb nyírási sebesség tartományban, amihez a dinamikai viszkozitás kapilláris viszkoziméterrel elvégzett pontos mérésére volt szükség a megfelelő hőmérséklet tartományban.

A nemlineáris viszkoelasztikus tulajdonságok reometriai szempontból, tehát igazán jól mérhetően, a nagy amplitúdójú oszcillációs nyírási (LAOS) tesztek során jelennek meg. Ráadásul ezek a LAOS tesztek a motivációt nyújtó járműipari együttműködés szempontjából is fontos mérési adatokat szolgáltatnak. Fontos célom volt tehát ilyen mérések segítségével kísérletileg feltérképezni a reprezentáns szilikonolaj nemlineáris viszkoelasztikus

viselkedését, valamint továbbfejleszteni a koncentrált paraméteres nemlineáris reológiai modellt úgy, hogy a LAOS tesztek eredményeit is szimulálni tudja.

A legfontosabb koncentrált paraméteres reológiai modelleknek különböző típusú ismert térfüggő általánosításai vannak, amelyekben az időderiváltat egy alkalmasan megválasztott differenciál-operátorral kell helyettesíteni. Céljaim között szerepelt egy ilyen térfüggő általánosítás kidolgozása és szimulációs tesztelése is. Erre magának a reométerben zajló nyírási folyamatnak a szimulációja is rendkívül jó lehetőséget adott: bizonyos nemlineáris viszkoelasztikus folyamatok, mint pl. a Weissenberg-effektus, tisztázatlan mértékben befolyásolják a reométeres mérést. A térfüggő modell bonyolult parciális differenciálegyenletei miatt a szimulációt egy végeselemes szoftver segítségével terveztem végrehajtani.

## Alkalmazott anyagok, eszközök, módszerek

### Szilikonolaj

Az általunk vizsgált anyag az egyik legszélesebb körben használt szilíciumalapú szerves polimer a poli-dimetil-sziloxán (*polydimethylsiloxane*, PDMS). Képlete  $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ , ahol  $n$  az ismétlődő monomer egységek száma. Minél nagyobb a minta molekulatömege (minél nagyobb  $n$ ) annál nagyobb a minta kinematikai viszkozitása.

A disszertációban az AK1.000.000. (Wacker Chemie) szilikonolaj reológiai mérésével és modellezésével kapcsolatos vizsgálataink eredményeit mutatom be. A mintának igen nagy, megközelítőleg 1000 Pas a viszkozitása 25 °C-on. A választott anyag jól reprezentálja a 200 és 2000 Pas viszkozitás közé eső szilikonolajokat, melyek mindegyike nemlineáris viszkoelasztikus anyag.

### Mérések rotációs reométerrel

A rotációs és oszcillációs méréseket egy Anton Paar Physica MCR 101 típusú reométerrel végeztük. Ez egy modern, számítógép-vezérelt műszer, mely már légcsapágyat tartalmaz, így a mérőtest forgásakor fellépő súrlódási veszteség igen kicsi, ezáltal lehetővé teszi a pontos mérést a rotációs és oszcillációs vizsgálatok során. A reométer mérési frekvenciáját a 0,01–100 Hz tartományban, míg a hőmérsékletet 0 és 120 °C fok között tudjuk változtatni.

A PDMS tisztán viszkózus tulajdonságának leírásához egyszerű nyírási tesztekkel végeztünk, vagyis lineárisan növeltük a nyírási sebességet, miközben mértük a nyírófeszültséget. Amplitúdó-pásztázó mérésekkel határoztuk meg a szilikonolaj lineáris és nemlineáris viszkoelasztikus tartományát. Az amplitúdó-pásztázó mérések lényege, hogy folyamatosan növeljük a bemenő tisztán szinuszos nyírás amplitúdóját, miközben vizsgáljuk a tárolási és veszteségi modulusokat. Az anyag lineáris viszkoelasztikus tulajdonságait kis amplitúdójú (SAOS) frekvencia-pásztázó tesztekkel vizsgáltuk, vagyis a tisztán szinuszos

bemenő jel frekvenciáját növeltük, miközben vizsgáltuk a tárolási és veszteségi modulus alakulását.

A régebbi gyártású hagyományos reométereknél (pl.: MCR 101) nem lehetett közvetlenül a mért időfüggő nyírófeszültség jelhez hozzáférni, ezért a szilikonolaj nemlineáris viszkoelasztikus tulajdonágainak leírásához szükséges LAOS tesztek a legújabb Anton Paar Physica, MCR 702-es reométeren végeztük el. A szoftverből mind a bemenő időfüggő nyírás, kimenő időfüggő nyírófeszültség jel, mind az FT reológiai, mind az Ewoldt paraméterek hozzáférhetőek.

A méréseinkhez legtöbbször a 10 mm belső-henger átmérőjű koncentrikus henger (CC10) geometria, illetve bizonyos esetekben a 25 mm átmérőjű kúp-lap (CP25) geometria bizonyult optimálisnak, ezért ezeket használtuk.

### **Mérések kapilláris reométerrel**

Kapilláris reométeres méréseket végeztünk az anyag nagy nyírási sebességhez tartozó viszkózus tulajdonságainak meghatározására. Az eszköz működésének alapelve az, hogy egy vékony kapilláris csövön keresztül állandó sebességgel átáramoltatjuk a vizsgálandó folyadékot, eközben mérjük az áramlás fenntartásához szükséges nyomást. Ezekből a mért adatokból matematikai számításokkal a nyírási sebesség és nyírófeszültség, tehát a viszkozitás is megkapható. A kapilláris reométerben kialakult áramlási kép nem homogén, számos korrekciót kell alkalmazni, hogy a mért (látszólagos) adatokból valódi, elemezhető adatokat nyerjünk.

Mi egy Göttfert Rheograph 25 típusú kapilláris reométerrel mértünk. A műszer képes egészen nagy nyírási sebesség tartományban ( $10^5$  1/s) is a minta viszkozitásának megadására. Ez a műszer egyszerre két különböző kapillárison nyomja át a mérendő folyadékot, ezzel is jelentősen pontosítva a mérést. A szoftver a megfelelő korrekciókat automatikusan elvégzi.

## **Mérések DWS módszerrel**

A Diffusing Wave Spectroscopy egy mára már kiforrottnak tekinthető módszer a folyadékok nagyfrekvenciás reológiai tulajdonságainak vizsgálatára. Ez a módszer a passzív mikrореológiai eljárások körébe tartozik, amely a mintán szóródó fény fluktuációiból tud a minta lineáris viszkoelasztikus jellemzőire következtetni. Lényege, hogy egy lézernyalábbal világítjuk meg a folyadékmintánkat. A beérkező fény többször szóródik a minta részecskéin. Egy detektorral megmérjük a szórt fény intenzitását az idő függvényében. Ennek a korrelációs tulajdonságaiból kiszámítható a fényt szóró részecskék véletlen hőmozgásának átlagos négyzetes elmozdulása. Az elmozdulásból mikrореológiai számításokkal megkaphatjuk az anyagra jellemző elasztikus és viszkózus tulajdonságokat, azaz a tárolási ( $G'$ ) és veszteségi ( $G''$ ) moduluszt.

Az átlátszó anyagoknál, mint pl. a PDMS, a fény szóródását mesterségesen kell előidézni, jellemző módon nyomjelző részecskéket kell eloszlatni a mintában. A szilikonolaj fényszórásos vizsgálatához titán-dioxid nyomjelző részecskék bizonyultak a legmegfelelőbbnek.

Az egyenletesen eloszlatott, jól definiált átlagos hidrodinamikai átmérővel rendelkező nyomjelző részecskéket tartalmazó mintán már elvégezhetjük a DWS méréseket. A nagy viszkozitású szilikonolajat DWS ReserchLab (LS Instruments) készülékkel vizsgáltuk transzmissziós módban. A készülék tartalmaz egy szoftver csomagot, amely elvégzi a szükséges mikrореológiai számításokat.

## **Matematikai és numerikus szimulációs szoftverek**

A mérésekre illesztett és később számos megfontolás alapján meghatározott konstitutív egyenletek megoldását többfajta szimulációs környezetben valósítottuk meg.



A koncentrált paraméterű (azaz térváltozótól független) modelleket tartalmazó szimulációkat a Wolfram Mathematica és a Matlab programok segítségével oldottuk meg. A definiált konstitúciós egyenletek olyan közönséges differenciálegyenletek, melyeket csak numerikus módon lehet megoldani. Ezért egy olyan programkódot készítettünk, amely a következő módon működik: beállítjuk a kívánt nyírási sebesség jelet, és a program megoldja a konstitúciós egyenleteket, majd meghatározza a nyírófeszültség jelet. A program a bemenő nyírási sebesség és kimenő nyírófeszültség jelből kiszámolja a megfelelő lineáris és nemlineáris viszkoelasztikus jelleget leíró mennyiségeket. Ezt a programot tehát egy 'virtuális reométernek' is tekinthetjük.

A koncentrált paraméterű konstitúciós egyenlet általánosításával kapott térfüggő parciális differenciálegyenlet-rendszert tartalmazó modellek megoldásához numerikus módszerre volt szükség a bonyolultságuk miatt. A végeselemes módszerek (FEM) jól alkalmazhatók ilyen célra, ezért a Comsol szoftvert használtam. Ez egy modul rendszerű, rendkívül széles körben használható végeselemes szimulációs szoftver, amely lehetővé teszi azt is, hogy a szokásos fizikai folyamatokat leíró egyenleteket kiegészítsük további differenciálegyenletekkel, mint pl. a térfüggő konstitúciós egyenletek.

## Új tudományos eredmények

1. Rotációs reométerrel megmértem egy reprezentáns nagy viszkozitású szilikonolaj (Wacker AK1.000.000) viszkoelasztikus tulajdonságait a frekvencia és a hőmérséklet függvényében. Kapilláris viszkoziméterrel kiegészítő méréseket végeztem a szilikonolaj dinamikai viszkozitására vonatkozóan a reométerrel elérhetőnél lényegesen nagyobb nyírási sebesség tartományban is. A mérési adatok analízisével megállapítottam, hogy a szilikonolaj nemlineáris viszkoelasztikus folyadék, a viszkozitásának a nyírási sebességtől való függése pszeudoplasztikus (*shear-thinning*) viselkedést mutat, teljesíti az ún. Cox-Merz szabályt, továbbá rendelkezik az ún. TTS (*time-temperature superposition*) tulajdonsággal. Kis amplitúdójú oszcillációs nyírási (SAOS) méréseimre alapozva meghatároztam az előbbi tulajdonságokat jellemző anyagi paramétereket.

A méréseimre alapozva kidolgoztam egy állandó súlyozású, ötelemű, White-Metzner típusú koncentrált paraméteres konstitúciós (anyagi) egyenletet, amely jól leírja az 1. pontban ismertetett nemlineáris viszkoelasztikus tulajdonságok mindegyikét. Ebben a modellben a viszkozitásnak a nyírási sebességtől való függését a Cox-Merz szabály segítségével definiáltam, az egyes elemek közötti súlyozást pedig a lineáris tartományban érvényes arányok szerinti választottam meg.

[T1, T2, T3]

2. A nagyfrekvenciás tartományban egy újfajta, ún. *Diffusing Wave Spectroscopy* (DWS) módszerrel mért veszteségi és tárolási modulusz adatok vizsgálata alapján megállapítottam, hogy a 20 – 70 °C hőmérsékleti tartományban a DWS módszerrel kapott eredmények jól illeszkednek a SAOS mérések eredményeihez, különösen a magasabb hőmérsékleti értékek esetén. Megállapítottam továbbá, hogy  $10^8$  rad/s körfrekvenciáig nincs második

keresztelési pontja a veszteségi és tárolási modulusz görbéknek, amelyek a teljes nagyfrekvenciás tartományban sima frekvenciafüggésűek és dominánsan elasztikus viselkedést mutatnak.

Kimutattam, hogy a szilikonolaj a reométerrel mérhető, tipikusan 0.01–100 Hz tartománynál lényegesen szélesebb frekvencia tartományban, legalább 16 kHz értékig eleget tesz a Cox-Merz szabálynak.

Megállapítottam, hogy a nagyfrekvenciás tartományban a domináns moduluszok továbbra is eleget tesznek a TTS szabálynak, erre alapozva meghatároztam azt a 60 °C-ra érvényes mestergörbét, mely a két műszerrel mért, közel hat dekádát átfogó frekvencia tartományra érvényes. Ezt a mestergörbét egy hatelemű Maxwell-modellel illesztettem, amely pontosan modellezi a szilikonolaj lineáris viszkoelasztikus tulajdonságait.

[T3]

**3.** A szilikonolajon végzett nagy amplitúdójú oszcillációs nyírási (LAOS) tesztek mérési eredményeinek elemzése során megállapítottam, hogy a nemlineáris viszkoelasztikus viselkedés tipikusan a 100% nyírási amplitúdó felett kezd jelentőssé válni, továbbá nagyobb oszcillációs körfrekvenciák esetén mindig erősebb a nemlinearitás.

A viszkózus illetve elasztikus nyírófeszültségre vonatkozó Lissajous-Bodwitch görbék elemzésével megállapítottam, hogy a szilikonolaj a nemlineáris tartományban viszkozitás szempontból ún. ciklikusan pszeudoplasztikus (*intracycle shear thinning*), elasztikus szempontból pedig ún. ciklikusan nyírásra keményedő (*intracycle strain thickening*) anyagként viselkedik. A folyamatok elemzése során kimutattam, hogy a viszkózus nyírófeszültség jelben megjelenő másodlagos hurkok (*secondary loop*) a reométer vezérlőrendszere által létrehozott nyírási sebesség jel nem tisztán szinuszos jellegének a következményei.

A DWS és SAOS mérésekre alapozva kidolgoztam egy módosított, hatelemű, változó súlyozású, White-Metzner típusú koncentrált paraméteres konstitúciós egyenletet. Szemben az 1. tézispontban ismertetett állandó súlyozású ötelemű White-Metzner-moddal, ez a konstitutív egyenlet az amplitúdó-pásztázó illetve a LAOS mérések eredményeit is kiválóan modellezi. A szimulált eredmények mind a mért nyers nyírófeszültségre, mind a belőlük számolt elasztikus és viszkózus Lissajous-Bodwitch görbékre tökéletesen illeszkednek.

A szimulációk segítségével kiegészített mérési eredmények alapján, az ún. Pipkin-diagramok segítségével összehasonlítottam kétféle, a nemlineáris tulajdonságokat jellemző mennyiséget, mind az elasztikus, mind a viszkózus viselkedésre vonatkozóan. Megállapítottam, hogy a nemlineáris viselkedés döntő mértékben megnöveli a magasabb felharmonikus komponensek súlyát a nyírófeszültségben. Az általam végzett szimulációk előrejelzése szerint a nemlineáris viszkózus jellegben egy lokális maximum figyelhető meg 50 rad/s körfrekvencia értéknél, a nemlineáris elasztikus jelleg pedig 30 rad/s érték fölött lényegében függetlenné válik a körfrekvenciától.

[T3, T4]

**4.** A koncentrált paraméteres, változó súlyozású White-Metzner-modellt térkoordinátáktól függő konstitúciós egyenletté általánosítottam, melyben a nyírófeszültség-mező nagy deformációkra is érvényes ún. *upper-convected* deriváltja helyettesíti a koncentrált paraméterű modell egyszerű időderiváltját. Ezzel a térfüggő konstitúciós egyenlettel két reometriai mérést modelleztem végeselemes szimulációval.

A kúp-lap (CP) geometriájú mérés végeselemes modellezésével kiszámítottam a szilikonolaj által a mérő geometriára a forgástengely irányában ható erőt a nyírási sebesség függvényében. Ez az erő a nyírásra merőleges irányban fellépő feszültségtenzor komponensek következménye, ez okozza a

Weissenberg-effektust is. Összevetve a kiszámított és a megmért értékeket megállapítottam, hogy a térfüggő konstitúciós egyenlet jól modellezi ezt a bonyolult nemlineáris viszkoelasztikus effektust.

A koncentrikus henger (CC) geometriájú mérés szimulációja esetében a CP geometriához használt végeselemes modellt továbbfejlesztettem úgy, hogy képes legyen leírni a szilikonolaj-levegő határfelület időbeli változásának dinamikáját is. A szimulációk reprodukálják a határfelületnek a mérés közben megfigyelthez hasonló alakváltozását. Az eredmények elemzésével megmutattam, hogy a Weissenberg-effektus érdemben nem befolyásolja a dinamikai viszkozitás mérésének pontosságát CC10 geometria esetén.

[T3]

## Publikációk

### A tézispontokat tartalmazó közlemények:

- [T1] **Kőkuti Zoltán**, Kokavecz János, Holczer István, Danyi Antal, Gábor Zoltán, Czirják Attila, Szabó Gábor, Ailer Piroska, Pézsa Nikolett, Németh Huba, Palkovics László:  
„*Torziós lengéscsillapítóban alkalmazott viszkózus folyadék modellezése*”,  
A Jövő Jáműve, 2009/3-4 (2009) pp. 61-65
- [T2] **Z. Kőkuti**, J. Kokavecz, A. Czirják, I. Holczer, A. Danyi, Z. Gábor, G. Szabó, N. Pézsa, P. Ailer, L. Palkovics:  
„*Nonlinear viscoelasticity and thixotropy of a silicone fluid*”,  
In: Ferencz Árpád, Klebniczki József, Lipócziné Csabai Sarolta, Borsné Pető Judit, Fábíán Csaba (szerk.) Proceedings of the 2nd International Scientific and Expert Conference: TEAM 2010 : AGTEDU 2010 (ISBN:978-963-7294-85-3): (2010) pp. 577-583.
- [T3] **Z. Kőkuti**, K. van Gruijthuijsen, M. Jenei, G. Tóth-Molnár, A. Czirják, J. Kokavecz, P. Ailer, L. Palkovics, A.C. Völker, G. Szabó:  
„*High-frequency rheology of a high viscosity silicone oil using diffusing wave spectroscopy*”,  
Applied Rheology **24**:6 (2014) 63984 (7 pages). IF:1,078
- [T4] **Z. Kőkuti**, L. Völker-Pop, M. Brandstätter, J. Kokavecz, P. Ailer, L. Palkovics, G. Szabó, A. Czirják:  
„*Exploring the nonlinear viscoelasticity of a high viscosity silicone oil with LAOS*”,  
Applied Rheology, submitted, 2015

### Egyéb közlemények

- [1] **Z. Kőkuti**, J. Kokavecz, A. Czirják, I. Holczer, A. Danyi, Z. Gábor, G. Szabó, N. Pézsa, P. Ailer, H. Németh, L. Palkovics:  
„*Nonlinear viscoelasticity of silicone fluids*”,  
poster az „Annual European Rheology Conference 2010, Göteborg” konferencián

- [2] **Z. Kőkuti**, J. Kokavecz, A. Czirják, I. Holczer, Cs. Vass, A. Danyi, Z. Gábor, G. Szabó, N. Pézsa, P. Ailer, H. Németh, L. Palkovics: „*Nonlinear viscoelasticity and thixotropy of silicone fluids*”, poster az „European Seminar on Coupled Problems 2010, Pilsen” konferencián
- [3] **Z. Kőkuti**, J. Kokavecz, A. Czirják, I. Holczer, A. Danyi, Z. Gábor, G. Szabó, N. Pézsa, P. Ailer, L. Palkovics: „*Nonlinear viscoelasticity and thixotropy of a silicone fluid*”, előadás a „TEAM 2010 / AGTEDU 2010” konferencián, Kecskemét, 2010. november 4–5.
- [4] **Z. Kőkuti**, J. Kokavecz, A. Czirják, I. Holczer, A. Danyi, Z. Gábor, G. Szabó, N. Pézsa, P. Ailer, L. Palkovics: „*Nonlinear viscoelasticity and thixotropy of a silicone fluid*”, A Jövő Jáműve, 2011/1-2, pp. 134-136
- [5] **Z. Kőkuti**, J. Kokavecz, A. Czirják, I. Holczer, A. Danyi, Z. Gábor, G. Szabó, N. Pézsa, P. Ailer, L. Palkovics: „*Nonlinear viscoelasticity and thixotropy of a silicone fluid*”, Annals Of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal Of Engineering, 2011/2, pp. 177-180
- [6] **Z. Kőkuti**, K. van Gruijthuijsen, M. Jenei, A. Czirják, J. Kokavecz, A. Danyi, P. Ailer, L. Palkovics, A. C. Völker, G. Szabó: „*High-frequency rheology of nonlinear silicone fluids*”, poster az “International Congress on Rheology 2012, Lisbon” konferencián
- [7] **Kőkúti Z.**, K. van Gruijthuijsen, Jenei M., Tóth-Molnár G., Czirják A., Kokavecz J., Szabó G., Ailer P., Palkovics L.: *Szilikonolajok nagyfrekvenciás reológiai tulajdonságai* A Jövő Jáműve: Járműipari Innováció (1-2) pp. 38-41. (2013)
- [8] A. Czirják, **Z. Kőkuti**, G. Tóth-Molnár, P. Ailer, L. Palkovics, G. Szabó: *Simulated Rheometry of a Nonlinear Viscoelastic Fluid* COMSOL Conference 2013, Rotterdam, contributed talk